DOI:10.11931/guihaia.gxzw201912010

不同生育时期干旱胁迫对迪庆苦荞和黑丰一号苦荞生长及生理特性的影响

董馥慧[2]，裴红宾[1,2*]，张永清[2,3]，杨甜[2]，杨倩[2]

（1. 山西师范大学 现代文理学院，山西 临汾 041004；2. 山西师范大学 生命科学学院，山西 临汾 041004；3. 山西师范大学 地理科学学院，山西 临汾 041004）

摘　要：为明确迪庆苦荞和黑丰一号苦荞的水分敏感时期，及其合理灌溉、稳产栽培、节水生产，本研究以迪庆苦荞和黑丰一号苦荞为试验材料，采用盆栽人工控水试验，研究了苗期、花期、成熟期三个不同时期干旱胁迫对其生长及生理特性的影响。结果表明：（1）干旱胁迫显著影响了这两种苦荞的生长，表现为株高、茎粗、叶面积、茎叶干重、根系体积、根系表面积、根系平均直径，根系干重、根系活力、根系可溶性蛋白含量均显著低于对照；根系SOD、POD、MDA、游离脯氨酸含量显著高于对照处理，干旱胁迫下迪庆苦荞比黑丰一号表现更优。（2）不同生育时期干旱胁迫对这两种苦荞各指标的影响程度表现为花期＞苗期＞成熟期。花期干旱胁迫对茎叶干重的影响最大，花期干旱胁迫与对照相比，迪庆苦荞和黑丰一号的茎叶干重分别降低了44.47%、51.04%。干旱影响了这两种苦荞的生长，花期干旱胁迫对其影响最大，迪庆苦荞在干旱胁迫下生长更好，受到的影响更小。在生产实践中，应注意苦荞花期水分的及时供应。

关键词：迪庆苦荞，黑丰一号苦荞，干旱胁迫，不同生育期，生长生理特性

中图分类号：　　　　　　　　　**文献标识码：**A

Effects of drought stress on growth and physiological characteristics of *Fagopyrum tataricum* (Diqing) and *F. tataricum*(Heifeng 1) at different growth stages

DONG Fuhui[2], PEI Hongbin[1,2*], ZHANG Yongqing[2,3], YANG Tian[2], YANG Qian[2]

（1 . *College of Modern Arts and Sciences*, *Shanxi Normal University*, Linfen 041004, Shanxi, China; 2. *College of Life Sciences*, *Shanxi Normal University*, Linfen 041004, Shanxi, China ; 3. *College of Geographical Sciences*, *Shanxi Normal University*, Linfen 041004, Shanxi, China）

Abstract: In order to understand its sensitive period of humidity, water-saving irrigation and production of *Fagopyrum tataricum* (Diqing) and *F. tataricum* (Heifeng 1) , we took *F. tataricum* (Diqing) and *F. tataricum* (Heifeng 1) as the experimental materials, artificial water control was carried out in the pot experiment to study the effects of drought stress on the two kinds of *F.*

收稿日期：2020-03-16

基金项目：国家自然科学基金（31571604)；山西师范大学现代文理学院基础研究项目(2019JCYJ16)[Support by National Natural Ncience Foundation of China(31571604); Basic Research Project of College of Modern Arts and Science, Shanxi Normal University(2019JCYJ16)]。

作者简介：董馥慧（1994-），女，山西临汾人，硕士研究生，主要从事植物生理生态研究，（E-mail）dongfuhui1994@126.com。

*__通信作者：__裴红宾，副教授，主要从事植物生理生态方面的教学与研究工作，（E-mail）bbpei65110@163.com。

tataricum growth and physiological characteristics in three different stages: seedling, blooming and mature stages. The results were as follows: (1) Drought stress significantly affected the growth of the two kinds of *F. tataricum,* especially for plant height, stem diameter, leaf area, shoot-leaf dry weight, root volume, root surface area, root average diameter, root dry weight, root activity, soluble protein content. These indexes are lower than that in the control group. However, the contents of SOD, POD, MDA and free proline content in root system were significantly higher than those in control group. *Fagopyrum tataricum* (Diqing) had better performance than *F. tataricum* (Heifeng 1) under drought stress. (2) The effects of drought stress on the two kinds of *F. tataricum* at different growth stages were flowering stage > seedling stage > mature stage. Drought stress at flowering stage had the greatest effect on shoot-leaf dry weight. Compared with the control group, shoot-leaf dry weight of *Fagopyrum tataricum* (Diqing) and *F. tataricum* (Heifeng 1) decreased by 44.47% and 51.04% respectively. It can be concluded that drought affects the growth of these two kinds of *F. tataricum*, and the greatest impact of drought on the growth of these two kinds of *F. tataricum* is at flowering stage, but under drought stress, drought-tolerant *F. tataricum* (Diqing) grew better and was less affected. In the production practice, it is necessary to timely supply water to *F. tataricum* at flowering stage.

Key words: *Fagopyrum tataricum* (Diqing), *Fagopyrum tataricum* (Heifeng 1), drought stress, different growth stags, growth physiological characteristics

苦荞（*Fagopyrum tataricum*）为蓼科（Polygonaceae）双子叶植物，是我国特有的食药两用杂粮作物，因其特有的保健作用及人们对健康食品的追求，促进了苦荞的种植开发（周一鸣等，2014）。苦荞具有耐寒、耐瘠、生育期短和适应性强等生理特性，在我国高寒和高原地区具有明显的区位优势和生产优势（张雄等，2013），但作物抗旱、耐瘠并不等同于喜好干旱与瘠薄的环境条件，黄土高原地区以干旱或季节性干旱为主的非生物胁迫仍是影响苦荞产量进一步提高的主要因素。

干旱是影响植物生长发育（Pereira et al., 2003）及分布的主要非生物胁迫因子之一（Caruso et al., 2007；Xu et al., 2008）。前人的研究结果表明，干旱不仅对植物的外部形态如株高、叶面积等指标产生影响（Nicotra et al., 2010），对生理特性如渗透调节物质可溶性糖、可溶性蛋白，SOD、POD 活性（邵艳军和山仑，2006）及产量产生影响，这些指标在应对干旱胁迫时会发生明显变化（赵璞等，2016；杨雪莲和朱友娟，2012）。作物的抗旱性是指在干旱的条件下依然能够保持较优的生长状态，对抗旱性的研究集中在外部形态、光合系统、抗氧化系统、渗透调节系统，诱导蛋白等方面。一些研究表明作物可通过发达的根系或生理调节来应对逆境，提高抗旱性，但关于哪些指标可以作为抗旱性的鉴别指标方面仍存在不同的看法。苦荞虽是耐旱作物，但耐旱并非喜旱，当遇到干旱胁迫时也会严重影响其品质和产量。已有研究表明在干旱胁迫下苦荞的各指标会发生变化，生长受到抑制（路之娟等，2018；赵海霞等，2019）。干旱胁迫首先影响到植物根系从而影响整棵植株的生长，由于苦荞须根系的结构特点，对根系完整的提取存在较多的技术问题，前人对其研究主要集中在表观形态，生理特性的研究，对苦荞为何耐旱的细胞分子水平的研究，对不同品种抗旱耐瘠的响应方面的研究较少。为进一步探明耐旱型苦荞（迪庆苦荞）耐旱的可能原因，本研究选用前期筛选出的 2 种耐旱性不同的苦荞品种进行比较，旨在为干旱地区苦荞的抗旱栽培，品种选育提供理论依据。

生长在干旱、半干旱地区的作物，在整个生育期内遇到的干旱胁迫往往是阶段性的，不同作物对不同生育阶段干旱的响应不同，在不同阶段对水分的需求量也不同。多数作物都有一个水分敏感期，如果水分敏感期缺水会严重影响作物生长（李长志等，2016）。因此，明确作物对水分的敏感时期，对作物的水分管理乃至播种期的调整具有重要的现实意义。已有

相关文献指出，开花期是苦荞对水分较为敏感的时期，此时缺水，会影响灌浆，导致不实（侯保俊和何太，2012），但不同抗旱性苦荞有无区别？尤其是不同抗旱性苦荞在不同生育时期干旱胁迫下各生理与形态等量性指标的变化情况如何等方面则鲜有报道。为此，该文通过盆栽控水试验研究 2 种耐旱性不同的苦荞在不同时期干旱胁迫下各生理与形态指标水平的量性变化，探究 2 个不同耐旱型品种旱敏感时期的生理生态变化，进而为这 2 种苦荞的抗旱稳产栽培提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试苦荞品种为前期筛选出的耐旱型品种‘迪庆苦荞’和旱敏感型品种‘黑丰一号’（路之娟等，2018），均由山西省农业科学院高寒作物研究所提供；供试土壤养分含量为：全氮 0.08 $g·kg^{-1}$，速效磷 2.9 $mg·kg^{-1}$，速效钾 92.37 $mg·kg^{-1}$；供试肥料为分析纯试剂尿素（含 N 46%）、过磷酸钙（含 P_2O_5 15%）和氯化钾（含 K_2O 52%）。

1.2 试验设计与实施

本试验于 2018 年 5 月—9 月在山西师范大学塑料防雨棚中进行。试验设计为三因素完全随机设计。供试苦荞品种（因素 A）为耐旱型‘迪庆苦荞’和旱敏感型‘黑丰一号’，分别记作 D、H；水分处理（因素 B）为：正常供水（土壤含水量为田间持水量的 70%～80%）、干旱胁迫（土壤含水量为田间持水量的 30%～40%），分别记作 CK、S；干旱胁迫时期（因素 C）：苗期、花期、成熟期（各时期干旱胁迫时间均为 20 d）。共计 12 个处理，每个处理重复 6 次。

试验实施：采用盆栽试验，每盆装风干后过筛混匀的土沙 13 kg 作为培养基质，施尿素 0.2 $g·kg^{-1}$、过磷酸钙 0.35 $g·kg^{-1}$、氯化钾 0.21 $g·kg^{-1}$，作为基肥与沙土混匀一次施入。播种前选取饱满、均一且无病虫害的苦荞种子，经 H_2O_2 消毒、反复冲洗后用去离子水浸泡 12 h，5 月 5 日播种，每盆播种 15 粒。播种后所有盆土正常等量浇水，确保种子顺利出苗。待齐苗后间苗，每盆留苗 5 株。三叶一心时，进行苗期水分控制干旱胁迫处理，花初期开始进行花期干旱胁迫处理，花末期进行成熟期干旱胁迫处理。各处理除干旱胁迫的时期外，其余时期土壤含水量均与对照相同。在每天 18：00 通过称重控水法补充水分，使各处理含水量保持在设定范围内。期间随机调换花盆摆放位置。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 形态指标

分别在苦荞苗期、花期、成熟期结束干旱胁迫后第 2 天，各处理随机选取 3 株。株高、最长根长用直尺测量；茎粗用游标卡尺测量；叶面积用 LI-3000C 便携式叶面仪测定；将植株分地上部和地下部于 105 ℃杀青 30min，75 ℃烘干至恒重，进行干物质重量测定。另取三株采用英国产 Delta-T SCAN 根系分析系统，进行根系表面积、根系体积、根系平均直径测定。

1.3.2 生理指标

分别在苦荞苗期、花期、成熟期结束干旱胁迫后第 2 天，各处理随机选取 3 株，洗净后用滤纸擦干，根尖部分用 TTC 法测定根系活力（张志良等，2019）；主根及侧根部分测定 SOD、POD 活性、MDA 含量、根系可溶性糖含量、根系可溶性蛋白质含量、根系游离脯氨酸含量，分别采用氮蓝四唑法（张志良等，2019）、愈创木酚比色法（张志良等，2019）、硫代巴比妥酸法（张志良等，2019）、蒽酮比色法（张志良等，2019）、考马斯亮蓝 G-250 染色法（张志良等，2019）和酸性茚三酮法测定（张志良等，2019）；叶片用丙酮一乙醇直接浸提法（张志良等，2019）测定叶绿素。

1.4 数据处理

用 SPSS 19.0 软件进行数据统计分析，Duncan’s 法进行多重比较，Microsoft Excel 2010

软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同生育时期干旱胁迫对苦荞植株形态指标的影响

2.1.1 茎、叶形态指标

由表 1 可知，耐旱性不同的两个品种处理及不同时期干旱对苦荞植株地上部生长的影响均是极显著的（*P*＜0.01）。正常供水与干旱胁迫处理间比较均表现为 CK＞S；耐旱性不同的两个品种处理间比较均表现为迪庆苦荞＞黑丰一号；两个品种在不同生育时期干旱胁迫与同期对照相比地上部各形态指标均有不同程度的降低，降幅为花期＞苗期＞成熟期，花期干旱胁迫对其影响最大。迪庆苦荞和黑丰一号苦荞在花期干旱胁迫（S）与对照（CK）相比株高、茎粗、叶面积、茎叶干重降幅分别为 15.59%、18.68%；20%、24.28%；23.16%、35.87%；44.47%、51.04%，均达显著差异水平（*P*＜0.05）。各指标降幅表现为地上干重＞叶面积＞茎粗＞株高；黑丰＞迪庆，花期干旱对地上部干重影响最大，耐旱品种生长受干旱胁迫影响较旱敏感品种为轻，降幅较小。

表 1　不同时期干旱胁迫对苦荞植株地上部生长的影响

Table 1　Effects of drought stress on shoot growth of *Fagopyrum tataricum* at different growth stages

胁迫时期 Stress stage	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	叶面积 Leaf area (mm^2)	茎叶干重 Shoot-leaf dry weight (g)
苗期 Seedling stage	D-S	27.31±0.23gh	3.20±0.11e	1328.74±98.99f	0.97±0.06gh
	D-CK	30.33±0.12g	3.71±0.11d	1547.62±11.19e	1.33±0.06g
	H-S	21.44±0.32i	2.10±0.06g	749.57±14.23h	0.70±0.09h
	H-CK	24.61±0.28hi	2.62±0.03f	949.14±13.34g	1.00±0.06gh
花期 Flowering stage	D-S	62.14±0.16e	5.00±0.01c	1878.46±28.85c	4.17±0.13e
	D-CK	73.62±1.63c	6.25±0.29b	2444.67±29.96a	7.51±0.11c
	H-S	52.41±0.72f	3.99±0.09d	1306.55±10.96f	3.29±0.15f
	H-CK	64.45±2.47e	5.27±0.35c	2037.37±30.83b	6.72±0.25d
成熟期 Mature stage	D-S	85.35±1.03b	6.31±0.17b	1801.04±46.51cd	9.22±0.06b
	D-CK	92.87±1.45a	6.90±0.06a	2091.33±8.85b	10.62±0.18a
	H-S	68.55±0.84d	5.37±0.04c	1575.17±28.71e	8.03±0.45c
	H-CK	74.66±2.16c	5.89±0.08b	1737.36±30.83d	9.50±0.24b
A		236.716**	128.418**	437.363**	47.083**
B		103.238**	74.132**	274.465**	239.11**
C		2045.067**	442.216**	487.314**	1881.322**
A×B×C		10.373**	2.143*	18.138**	19.914**

注：表内各处理数据为平均值±标准误，同列数据后不同字母表示处理间差异达显著水平（*P*＜0.05）；各因素数据（A、B、C）为方差分析 *F* 值，*、**、ns 分别代表差异显著（*P*＜0.05）、差异极显著（*P*＜0.01）、差异不显著（*P*＞0.05）。下同。

Note: The data in the table mean average±standard error, and different letters after the same column data indicate significant differences between treatments (*P*<0.05). The data of each factor （A, B, C） are anova *F* value, *, ** and ns respectively represent significant differences (*P*<0.05), extremely significant differences (*P*<0.01), and no

significant differences ($P > 0.05$). The same below.

2.1.2 根系形态指标

由表 2 可知，耐旱性不同的两个品种处理及不同时期干旱对苦荞植株根系生长的影响是显著的（P<0.05）。正常供水与干旱胁迫处理间比较除主根长外均表现为 CK＞S；耐旱性不同的两个品种处理间比较均表现为迪庆苦荞＞黑丰一号；根系各形态指标在不同时期干旱胁迫与同期对照相比发生变化，变幅也表现为花期＞苗期＞成熟期，花期干旱胁迫对其影响最大，耐旱品种比旱敏感品种根系更发达。迪庆苦荞和黑丰一号苦荞在花期干旱胁迫（S）与对照（CK）相比根系平均直径、根系表面积、根系体积、根系干重均降低，降幅分别为20%、21.95%；9.71%、10.87%；20.66%、21.96%；34.42%、38.93%，达显著差异水平（P<0.05）。与对照相比黑丰一号主根长降低了 27.66%，迪庆苦荞的主根长却增加了 12.26%。各指标变幅迪庆苦荞表现为根系干重＞根系体积＞根系平均直径＞主根长＞根系表面积，黑丰一号苦荞表现为根系干重＞主根长＞根系体积＞根系平均直径＞根系表面积，除主根长外降幅表现为黑丰一号＞迪庆苦荞。表明花期干旱对根系干重影响较大，迪庆苦荞可能通过增加根长来增加根系在土壤中的深度，从而吸收土壤深层水分维持自身所需，增强其抗旱能力，其根系生长受干旱胁迫影响较旱敏感品种为轻，降幅较小。

表 2　不同时期干旱胁迫对苦荞植株根系形态指标影响

Table 2　Effects of drought stress on the development of root system of *Fagopyrum tataricum* at different growth durations

胁迫时期 Stress stage	处理 Treatment	主根长 Main root length (cm)	根系平均直径 Root average diameter (mm)	根系表面积 Root superficial area (mm^2)	根系体积 Root volume (cm^3)	根系干重 Root dry wt (g)
苗期 Seedling stage	D-S	21.94±0.52de	0.55±0.02gh	4466.83±176.72d	6.01±0.01g	0.29±0.01e
	D-CK	20.80±0.48e	0.655±0.01def	4662.50±152.01d	6.57±0.23f	0.33±0.02e
	H-S	15.03±0.03g	0.45±0.03i	3370.50±107.16e	3.77±0.19i	0.21±0.04e
	H-CK	17.56±0.25f	0.53±0.02h	3584.13±118.65e	4.51±0.09h	0.24±0.07e
花期 Flowering stage	D-S	28.66±0.42a	0.76±0.03c	8733.63±219.26b	7.45±0.18cd	0.80±0.01cd
	D-CK	25.53±0.60bc	0.95±0.06a	9673.33±239.49a	9.39±0.03a	1.22±0.03a
	H-S	15.48±0.44g	0.64±0.08ef	7540.80±171.03c	6.61±0.18ef	0.69±0.01d
	H-CK	21.40±1.60e	0.82±0.05b	8460.70±194.96b	8.47±0.05b	1.13±0.08ab
成熟期 Mature stage	D-S	27.26±0.26ab	0.658±0.06de	8541.26±103.42b	7.07±0.09de	1.01±0.16abc
	D-CK	26.23±0.46b	0.71±0.04cd	8673.33±239.49b	7.68±0.19c	1.04±0.22abc
	H-S	21.15±0.98e	0.52±0.01h	7161.53±158.82c	5.77±0.11g	0.91±0.01bcd
	H-CK	23.86±0.82cd	0.59±0.06fg	7460.70±194.96c	6.04±0.24g	0.93±0.12bcd
A		221.097**	111.638**	134.007**	274.097**	4.037ns
B		5.856*	97.752**	18.991**	121.866**	11.681**
C		71.967**	172.708**	769.153**	311.329**	93.115**
A×B×C		11.333**	3.442*	1.672ns	12.14**	2.173ns

2.2 不同生育时期干旱胁迫对苦荞植株生理指标的影响

2.2.1 根系活力、SOD、POD 活性及 MDA 含量

由表 3 可知，耐旱性不同的两个品种处理及不同时期干旱对苦荞植株根系活力、SOD、POD 活性及 MDA 含量的影响是极显著的（P<0.01）。正常供水与干旱胁迫处理间比较除根系活力均表现为 S＞CK；耐旱性不同的两个品种处理间比较除 MDA 含量外均表现为迪庆苦荞＞黑丰一号；各指标在不同时期干旱下与对照相比发生变化，变幅变化与形态指标一

致：花期＞苗期＞成熟期，花期干旱胁迫对其影响最大。迪庆苦荞和黑丰一号苦荞在花期干旱胁迫（S）下与对照（CK）相比根系活力降低，降幅为 25.6%、28%，SOD 活性、POD 活性、MDA 含量升高，增幅为 41.64%、33.29%；43.78%、37.5%；26.07%、29.36%，达显著差异水平（P＜0.05）。各指标变幅表现为 POD 活性＞SOD 活性＞MDA 含量＞根系活力，根系活力及 MDA 含量变幅表现为黑丰一号＞迪庆苦荞，酶活性变幅表现为迪庆苦荞＞黑丰一号。在花期干旱下耐旱品种的细胞膜质过氧化程度低、根系活力受到的影响小，而过氧化物酶受到的影响比旱敏感品种更大。

表 3　不同时期干旱胁迫对苦荞根系活力、SOD、POD 活性及 MDA 含量的影响

Table 3 Effects of drought stress on root activity, SOD activity, POD activity and MDA content in root of *Fagopyrum tataricum* at different growth stages

胁迫时期 Stress stage	处理 Treatment	根系活力 Root activity (mg·g^{-1})	SOD 活性 SOD activity (U·g^{-1})	POD 活性 POD activity (U·g·min^{-1})	MDA 含量 MDA content (nmol·g^{-1})
苗期 Seedling stage	D-S	0.45±0.01ef	515.26±19.02b	46.36±1.75cde	4.81±0.23g
	D-CK	0.55±0.03bc	378.22±6.48d	33.88±0.92f	4.04±0.15g
	H-S	0.32±0.02g	317.31±10.47e	33.91±1.85f	10.44±0.32de
	H-CK	0.41±0.04f	254.95±19.05f	25.55±1.54g	8.53±0.53f
花期 Flowering stage	D-S	0.61±0.05b	690.25±26.72a	71.69±1.33a	9.96±0.48e
	D-CK	0.82±0.02a	487.32±9.11b	49.86±3.28bcd	7.90±0.45f
	H-S	0.54±0.03bcd	401.96±12.74cd	54.77±1.85b	16.52±0.61a
	H-CK	0.75±0.01a	301.56±19.31ef	39.84±2.80ef	12.77±0.27c
成熟期 Maturating stage	D-S	0.57±0.04bc	510.93±23.44b	50.59±2.66bc	11.11±0.32d
	D-CK	0.60±0.01bc	437.32±9.11c	42.86±3.28de	10.03±0.30e
	H-S	0.45±0.03def	288.26±6.64ef	35.66±1.89f	16.53±0.48a
	H-CK	0.51±0.01cde	251.56±19.31f	32.84±2.80f	14.56±0.25b
A		37.963**	50.24**	73.566**	795.404**
B		44.7**	444.572**	83.737**	106.578**
C		72.381**	115.314**	73.671**	398.974**
A×B×C		2.707*	6.295**	3.106*	4.153**

2.2.2 根系渗透调节物质

由表 4 可知，耐旱性不同的两个品种处理及不同时期干旱对苦荞植株根系可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、游离脯氨酸含量的影响是显著的（P＜0.05）。正常供水与干旱胁迫处理间比较除可溶性蛋白含量均表现为 S＞CK；耐旱性不同的两个品种处理间比较均表现为迪庆苦荞＞黑丰一号；各指标在不同生育时期干旱胁迫与对照相比发生了变化，变幅也表现为花期＞苗期＞成熟期，干旱明显影响了苦荞植株的渗透调节物质，花期干旱胁迫对其影响最大，耐旱品种比旱敏感品种表现更好。迪庆苦荞和黑丰一号苦荞在花期干旱胁迫（S）下与对照（CK）相比可溶性糖含量、游离脯氨酸含量升高，增幅为 36.78%、29.04%；38.73%、29.35%，可溶性蛋白含量显著降低，降幅为 22.31%、24.68%（P＜0.05）。各指标变幅表现为游离脯氨酸含量＞可溶性糖含量＞可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、游离脯氨酸含量增幅表现为迪庆苦荞＞黑丰一号、可溶性蛋白相反。干旱胁迫下苦荞通过增加游离脯氨酸与可溶性糖渗透调节物质，降低渗透势抵御旱境。

表 4　不同时期干旱胁迫对苦荞植株根系渗透调节物质的影响

Table 4　Effects of drought stress on soluble sugar content and soluble protein content and proline content in root of *Fagopyrum tataricum* at different growth stages

胁迫时期 Stress stage	处理 Treatment	可溶性糖含量 Soluble sugar content （mg·g-1）	可溶性蛋白含量 Soluble protein content （mg·g-1）	游离脯氨酸含量 Free proline content （μg·g-1）
苗期 Seedling stage	D-S	2.31±0.12bcd	4.72±0.28de	37.21±2.22cde
	D-CK	1.88±0.13de	5.34±0.12cd	28.84±3.73fg
	H-S	1.92±0.24cde	3.48±0.16f	27.32±0.88fg
	H-CK	1.64±0.11e	4.14±0.22ef	21.47±1.83g
花期 Flowering stage	D-S	3.83±0.29a	5.50±0.15cd	62.50±2.55a
	D-CK	2.8±0.08b	7.08±0.45a	45.05±2.26c
	H-S	3.51±0.17a	4.15±0.29ef	52.84±3.87b
	H-CK	2.72±0.25b	5.51±0.31cd	40.85±3.61cd
成熟期 Maturating stage	D-S	2.84±0.21b	6.15±0.34bc	43.40±1.31c
	D-CK	2.55±0.41bc	6.59±0.06ab	38.03±1.22cde
	H-S	2.45±0.35bcd	5.00±0.46de	35.01±1.81def
	H-CK	2.21±0.26bcde	5.37±0.37cd	31.05±2.84ef
A		39.22**	55.676**	74.99**
B		6.191*	23.521**	28.405**
C		18.745**	23.72**	36.829**
A×B×C		0.979ns	1.092ns	1.486ns

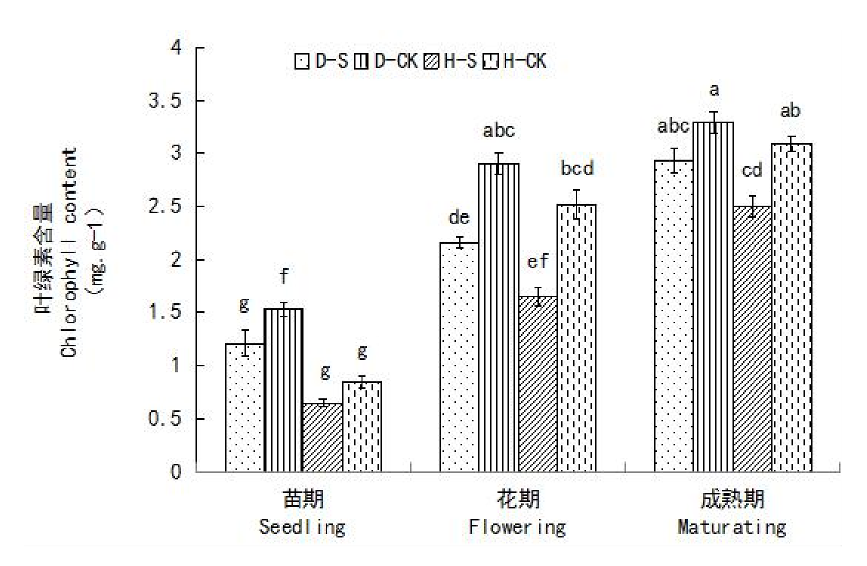
2.2.3 叶片叶绿素含量

由图 1 可知，耐旱性不同的两个品种处理及不同时期干旱对苦荞叶片叶绿素含量的影响是极显著的（$P<0.01$）。正常供水与干旱胁迫处理间比较均表现为 CK＞S；耐旱性不同的两个品种处理间比较均表现为迪庆苦荞＞黑丰一号；各指标在不同生育时期干旱胁迫与同期对照相比降低，降幅表现为花期＞苗期＞成熟期，花期干旱胁迫对其影响最大，迪庆苦荞和黑丰一号苦荞在花期干旱胁迫（S）下与对照（CK）相比叶片叶绿素含量分别降低了 25.51%、34.52%（$P<0.05$）。

表 5　三因素对苦荞叶片叶绿素含量的影响的方差分析 *F* 值

Table 5 Three factors influencing chlorophyll content in leaf of *Fagopyrum tataricum* analysis of anova *F* value

因素 Factor	*F* 值 *F* value
A	18.99**
B	23.83**
C	110.221**
A×B×C	0.941ns



图中不同字母表示处理间差异达显著水平（P<0.05）。

Different letters indicate significant differences among treatments (P<0.05).

图 1　不同时期干旱胁迫对苦荞叶片叶绿素含量的影响

Fig.1　Effects of drought stress on chlorophyll content in leaf of *Fagopyrum tataricum* at different growth stages

3 讨论

水分是植物生长中不可缺少的元素，干旱胁迫下植物的生长变化及响应机理一直是科学研究的热点（沈少炎等，2017）。诸多研究表明，植物在干旱胁迫下会发生一些表观上的变化，甚至生长发育延缓（刘永辉，2013；冯剑等，2016），如干旱胁迫下植物的叶片出现萎蔫，株高、茎粗、叶片面积的大小等发生明显变化，（刘三梅等，2016；孔德鑫等，2010）。在本研究中供试的 2 个不同耐旱品种苦荞的株高、茎粗、叶面积、地上干重在不同生育时期干旱胁迫下均受到了影响，表现为一致的下降趋势，但下降的幅度不同，旱敏感型品种黑丰一号苦荞各指标的下降幅度均大于耐旱型苦荞迪庆苦荞。比较 2 个品种各个时期干旱胁迫对苦荞生长的影响程度可以看出，无论抗旱性强弱，均表现为花期干旱胁迫对地上部形态指标的影响最大，各指标降幅也最大，其次是苗期干旱胁迫，成熟期干旱胁迫对其影响最小，因此，地上部各形态指标对各个时期干旱胁迫的敏感程度表现为花期＞苗期＞成熟期，但比较不同指标的变化幅度，仍可以看出，干旱胁迫下耐旱品种比旱敏感品种地上部生长受到的影响较小，各指标降幅较小，在干旱胁迫下表现出相对的生长优势。

干旱胁迫会影响植物根系的构型、水分的吸收利用及体内的水分平衡（Li et al.,2016），作物在受到干旱胁迫时，根系系统的生长会首先受到影响（张翠梅等，2018；王沣等，2018）。本试验也表现出了相同的结果，不同生育期下干旱胁迫均使两个品种苦荞的根系表面积、根系体积、根系干重、根系平均直径、主根长（黑丰一号）降低，但降低幅度不同，黑丰一号苦荞的降幅大于迪庆苦荞，说明它的耐旱性差，而迪庆苦荞的主根长却显著增加，说明干旱胁迫刺激了迪庆苦荞主根生长，它可以通过增加根长来吸收土壤深层水分来满足自身需要，抵御逆境，这可能正是其更为耐旱的原因之一，这与魏清江等（2018）、谢志玉和张文辉（2018）研究结论相似。与干旱胁迫对地上部生长的影响一致，花期干旱胁迫对根系形态的影响最大，变幅最大，其次是苗期干旱胁迫，成熟期干旱胁迫对根系影响最小。花期干旱胁迫中，对根系干重的影响最大，干旱胁迫下耐旱品种根系生长受到的影响较敏感品种为轻，各指标变幅更小，并能通过根系形态的调节更好的适应旱境。

干旱胁迫不仅对植物的形态方面产生影响，其生理代谢系统也会随之发生变化（张海燕等，2018）。SOD 、POD 是极重要的抗氧化酶，可消除作物因逆境产生的 O^- 和 H_2O_2，

缓解胁迫危害（Tatar & Gevrek, 2008）。可溶性糖含量、游离脯氨酸、可溶性蛋白是植物体内重要的渗透调节物质，水分胁迫下，植株通过积累渗透物质，增大浓度，降低渗透势，维持细胞膨压，来保持所需水分（张俊等，2015），从而抵御逆境，多数研究表明干旱胁迫下植物体内的可溶性糖含量，游离脯氨酸含量会增高，而可溶性蛋白存在不同的研究结果。MDA 反映的是植物细胞膜脂过氧化程度，干旱时会引起胞质膜产生膜脂过氧化作用（罗海婧等，2014）也是植物抗旱性研究的重要指标。本研究中，干旱胁迫下的两个品种苦荞均维持较高的 SOD 、POD 酶活性，可溶性糖含量、游离脯氨酸含量增高来适应逆境，缓解逆境带来的影响，与前人的研究保持了一致性（杨春婷等，2018），而可溶性蛋白含量降低，这可能是由于氨基酸与某些物质结合来防御水分消散有关，或与植物体内的氨基酸相互作用，增加蛋白质可溶性及水合作用、减少可溶性蛋白沉淀有关。根系活力反映根系的生长情况和活力水平，干旱胁迫使这两个品种苦荞的根系活力均降低。各时期干旱胁迫中花期干旱胁迫对两个品种苦荞根系生理指标的影响最大，变幅最大，其次是苗期干旱胁迫，成熟期干旱胁迫对其影响最小，因此，根系各生理指标对各个时期干旱胁迫的敏感程度表现为花期＞苗期＞成熟期。花期干旱胁迫中 POD 含量对干旱胁迫最为敏感。耐旱品种较旱敏感品种在干旱胁迫下有更强的清除活性氧的能力、能积累更多的渗透调节物质及维持更低的膜脂过氧化程度来抵御逆境，细胞受损程度更低，根系活力更高，这些生理水平的差异可能就是其抗旱能力更强的原因。植物在经历干旱胁迫后，叶片叶绿体结构会遭受损坏，造成叶绿素含量的降低从而影响到植物的光合作用。本研究中干旱胁迫后叶绿素含量表现为降低，花期干旱胁迫下的降幅最大，耐旱品种迪庆苦荞在干旱胁迫下叶片叶绿素含量受到的影响较旱敏感品种为轻，降幅更小，光合作用受到的影响就更小，与其根系、茎叶干重降低幅度较黑丰一号小表现出了一致性。

各个时期干旱胁迫对这两种耐旱性不同的苦荞的地上部形态、根系形态、酶活性、渗透调节物质、根系活力、叶片叶绿素含量均产生影响，其影响表现为花期＞苗期＞成熟期，花期是这两种苦荞对水分最为敏感的时期，生产实践中应多注意在花期水分的及时灌溉。耐旱品种（迪庆苦荞）在干旱胁迫条件下表现出更强的适应性，能够通过地上部形态，根系形态，生理系统的调节产生更优的应对策略来响应干旱胁迫，更适合作为干旱地区的品种种植的选择。

4 结论

综上所述，通过研究不同生育时期干旱胁迫对迪庆苦荞和黑丰一号苦荞生长发育的影响，发现在干旱胁迫下两种苦荞的各项指标发生变化的趋势基本一致，但变化幅度有所不同，耐旱品种生长及生理特性受干旱胁迫影响较旱敏感品种为轻，表现为对干旱有较强的适应力。各时期干旱胁迫对这两种苦荞的影响表现均为花期＞苗期＞成熟期，表明花期干旱胁迫对其生理生长的影响最大，是苦荞对水分较为敏感的时期。在生产实践中，应注意苦荞品种的选择，在田间管理中则应注意苦荞旱敏感时期（花期）水分的及时供应，在无法灌溉的前提条件下，可通过调整播种期，尽可能地使苦荞花期与当地雨季重合，以便最大程度地减少干旱带来的不良影响。

参考文献：

CARUSO A, CHEFDOR F, CARPIN S, et al., 2007. Physiological characterization and identification of genes differentially expressed in response to drought induced by PEG 60000 in *Populus canadensis* leaves[J]. J Plant Physiol, 165(9): 932-941.

FENG J, LIU Q, WANG J, et al., 2016. Effects of drought stress and allelopathy on growth, photosynthesis and physio-biochemical characteristics of *Terminalia catappa* seedlings [J]. Guihaia, 36(8): 969-979. [冯剑，刘强，王瑾，等，2016.干旱胁迫和化感作用对榄仁树幼苗生

长、光合作用及生理生化的影响[J]. 广西植物，36(8)：969-979.]

HOU BJ, HE T, 2012. Cultivation technology of *Fagopyrum tataricum* with high quality and high yield in high cold area [J]. Chin Agric Technol Ext, 28(1): 19-20. [侯保俊，何太，2012. 高寒冷凉区苦荞优质高产栽培技术[J]. 中国农技推广，28(1)：19-20.]

KONG DX, LIANG HL, WEI JQ, et al., 2010. Effects of soil drought stress on growth and some physiological properties of *Abrus mollis* seedlings [J]. Guihaia, 30(4): 521-525. [孔德鑫，梁惠凌，韦记青，等，2010.土壤干旱胁迫对毛鸡骨草幼苗生长及某些生理特性的影响[J].广西植物，30(4)：521-525.]

LI CZ, LI H, LIU Q, et al., 2016. Comparison of root development and fluorescent physiological characteristics of sweet potato exposure to drought stress in different growth stages [J]. J Plant Nutr Fert, 22(2): 511-517. [李长志，李欢，刘庆，等，2016. 不同生长时期干旱胁迫甘薯根系生长及荧光生理的特性比较[J]. 植物营养与肥料学报，22(2)：511-517.]

LIU S M, YANG Q H, LI X N, et al., 2016. Effects of drought stress on morphological indicators and physiological characteristics of sugarcane in different growth periods [J]. J S Agric, 47(8): 1273-1278. [刘三梅，杨清辉，李秀年，等，2016. 不同生育时期干旱胁迫对甘蔗形态指标及生理特性的影响[J]. 南方农业学报，47(8)：1273-1278.]

LIU YH, 2013. Physiological response and adaptation of summer maize (*Zea mays* L.) to water stress during different growth periods [J]. J Arid Land Resour Environ, 27(2): 171-175. [刘永辉，2013. 夏玉米不同生育期对水分胁迫的生理反应与适应[J]. 干旱区资源与环境，27(2)：171-175.]

LI X, ZENG R, LIAO H, 2016. Improving crop nutrient efficiency through root architecture modifications[J]. J Integr Plant Biol, 58(3): 193-202.

LUO HJ, ZHANG YQ, SHI YH, et al., 2014. Physiological response of seedlings of different *Phaseolus angularis* varieties to drought stress [J]. Plant Sci J, 32(5): 493-501. [罗海婧，张永清，石艳华，等，2014. 不同红小豆品种幼苗对干旱胁迫的生理响应[J]. 植物科学学报，32(5)：493-501.]

LU ZJ, ZHANG YQ, ZHANG C, 2018. The seedling growth and root physiological traits of *Fagopyrum tataricum* cultivars under drought stress [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 38(1): 112-120. [路之娟，张永清，张楚，2018. 干旱胁迫对不同苦荞品种苗期生长和根系生理特征的影响[J]. 西北植物学报，38(1)：112-120.]

LU ZJ, ZHANG YQ, ZHANG C, et al., 2018. Effects of water stress on physiological characteristics and yield of *Fagopyrum tataricum* at seedling stage of different genotypes [J]. Agric Res Arid Region, 36(2): 124-130. [路之娟，张永清，张楚，等，2018. 水分胁迫对不同基因型苦荞苗期根系生理特性及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究，36(2)：124-130.]

NICOTRA AB, ATKIN OK, BONSER SP, et al., 2010. Plant phenotypic plasticity in a changing climate[J]. Trends Plant Sci, 15(12): 684-692.

PEREIRA JS, CHAVES MM, MAROCO JP, 2003. Understanding plant responses to drought - from genes to the whole plant [Review] [J] . Funct Plant Biol, 30(3): 239-264.

SHAO YJ, SHAN L, 2006. Research progress on drought tolerance mechanism of plants [J]. Chin J Ecol-Agric, (4): 16-20. [邵艳军，山仑，2006. 植物耐旱机制研究进展[J]. 中国生态农业学报，(4)：16-20.]

SHEN SY, WU YX, ZHENG YS, 2017. Review on drought response in plants from phenotype to molecular [J]. Curr Biotechnol, 7(3): 169-176. [沈少炎，吴玉香，郑郁善，2017. 植物干旱胁迫响应机制研究进展——从表型到分子[J]. 生物技术进展，7(3)：169-176.]

TATAR O, GEVREK MN, 2008. Influence of water stress on proline accumulation, lipid

peroxidation and water content of wheat. [J]. Asian J Plant Sci, 7(4): 409-412.
WANG F, WANG MJ, SU SH, et al., 2018. Effects of straw returning on maize yield and root system spatial distribution under water stress[J]. Chin J Appl Ecol, 29(11): 3643-3648. [王沣，王美佳，苏思慧，等，2018.水分胁迫下秸秆还田对玉米产量和根系空间分布的影响[J].应用生态学报，29(11)：3643-3648.]
WEI QJ, FENG FF, MA ZZ, et al., 2018. Effects of drought rehydration on leaf photosynthesis, chlorophyll fluorescence and root system configuration of citrus seedlings [J]. Chin J Appl Ecol, 29(8): 2485-2492. [魏清江，冯芳芳，马张正，等，2018.干旱复水对柑橘幼苗叶片光合、叶绿素荧光和根系构型的影响[J].应用生态学报，29(8)：2485-2492.]
XIE ZY, ZHANG WH, 2018. Effects of drought and rewatering on growth and photosynthetic physioecological characteristics of *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Chin J Appl Ecol, 29(6): 1759-1767. [谢志玉，张文辉，2018.干旱和复水对文冠果生长及生理生态特性的影响[J].应用生态学报，29(6)：1759-1767.]
XU X, YANG F, XIAO X, et al., 2008. Sex-specific responses of *Populus cathayana* to drought and elevated temperatures[J]. Plant Cell Environ, 31(6): 850-860.
YANG CT, ZHANG YQ, MA XX, et al., 2018. Screening genotypes and identifying indicators of different *Fagopyrum tataricum* varieties with low phosphorus tolerance [J]. Chin J Appl Ecol, 29(9): 2997-3007.[杨春婷，张永清，马星星，等，2018. 苦荞耐低磷基因型筛选及评价指标的鉴定[J]. 应用生态学报，29(9)：2997-3007.]
YANG XL, ZHU YJ, 2012. Advances of plant drought stress [J]. Agric Eng, 2(11): 44-45. [杨雪莲，朱友娟，2012. 植物干旱胁迫研究进展[J]. 农业工程，2(11)：44-45.]
ZHANG CM, SHI SL, WU F, 2018. Effects of drought stress on root growth and physiological characteristics of different drought-resistant alfalfa varieties [J]. Sci Agric Sin, 51(5): 868-882. [张翠梅，师尚礼，吴芳，2018. 干旱胁迫对不同抗旱性苜蓿品种根系生长及生理特性影响[J]. 中国农业科学，51(5)：868-882.]
ZHANG HY, DUAN WX, XIE BT, et al., 2018. Effects of drought stress on endogenous hormones in sweet potato and its relationship with root yield [J]. Acta Agron Sin, 44(1): 126-136. [张海燕，段文学，解备涛，等，2018. 不同时期干旱胁迫对甘薯内源激素的影响及其与块根产量的关系[J]. 作物学报，44(1)：126-136.]
ZHANG J, LIU J, ZANG XW, et al., 2015. Effects of drought stress on peanut growth during different growth stages and compensatory effect after water recovery [J]. J Nucl Agric Sci , 29(6): 1190-1197. [张俊，刘娟，臧秀旺，等，2015. 不同生育时期干旱胁迫对花生产量及代谢调节的影响[J]. 核农学报，29(6)：1190-1197.]
ZHANG X, WANG LX, CHAI Y, et al., 2003. Sustainable development of minor food crops in China [J]. Sci Agric Sin, 36(12): 1595-1598. [张雄，王立祥，柴岩，等，2003. 小杂粮生产可持续发展探讨[J]. 中国农业科学，36(12)：1595-1598.]
ZHANG ZL, QU WJ, LI XF, 2009. Plant physiology experiment guidance [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press: 32-227. [张志良，瞿伟菁，李小方，2009. 植物生理学实验指导[M]. 4版. 北京：高等教育出版社：32-227.]
ZHAO HX, PEI HB, ZHANG YQ, et al., 2019. Effect of phosphorus on growth and phosphorus absorption and distribution of *Fagopyrum tataricum* under drought stress [J]. J Arid Land Resour Environ, 33(3): 177-183. [赵海霞，裴红宾，张永清，等，2019. 施磷对干旱胁迫下苦荞生长及磷素吸收分配的影响[J]. 干旱区资源与环境，33(3)：177-183.]
ZHAO P, LI M, JI ZF, et al., 2016. Counter-measures of drought physiology response in plant [J]. Agric Sci Bull, 32(15): 86-92. [赵璞，李梦，及增发，等，2016. 植物干旱响应生理对策研究

进展[J]. 中国农学通报，32(15)：86-92.]
ZHOU YM, CUI LL, WANG H, et al., 2014. Nutrient changes and nutritional evaluation of *Fagopyrum tataricum* during germination [J]. Food Sci, 35(13): 208-212. [周一鸣，崔琳琳，王宏，等，2014.苦荞在萌发过程中营养物质的变化及其营养评价[J]. 食品科学，35(13)：208-212.]